

Dreidimensionale Rekonstruktion von Oberflächenprofilen

Die Erfindung betrifft Verfahren zur Erfassung und Rekonstruktion von Strukturen auf Oberflächen, wie z.B. Erhebungen, Grate oder Senken.

5

Es sind verschiedene Verfahren bekannt, mit denen Profile von Oberflächen erfasst werden können. Zwei verschiedene Prinzipien können dabei unterschieden werden: Zum einen Verfahren, bei denen die zu charakterisierende Oberfläche direkt, z.B. mechanisch, abgetastet wird, zum anderen berührungslose Techniken.

10

Mechanische Abtastinstrumente, sogenannte „Profilometer“, führen eine Abtastnadel rasterförmig über die Oberfläche der Probe und detektieren dabei die sich durch das Oberflächenprofil vertikal ändernde Position der Nadelspitze. Sie werden häufig dort eingesetzt, wo die zu untersuchenden Objekte und der darauf zu erfassende Oberflächenbereich nicht sehr groß sind, da einerseits eine exakte Positionierung des Probenstücks unter dem Abtaster erforderlich ist, zum anderen die zeilenweise Abtastung größerer Felder mit einem entsprechenden zeitlichen Aufwand verbunden ist.

15

Berührungslose Abtastverfahren nutzen beispielsweise die Reflexion von Ultraschall (Prinzip des Echolots) oder basieren auf optischen (z.B. Laser-Scan) bzw. radartechnischen Verfahren. Je nach Einsatzgebiet ist dabei das eine oder andere Verfahren vorteilhafter. Ultraschallverfahren sind nicht in

allen Umgebungen und für sehr große Distanzen zwischen Objekt und Sensor geeignet. Für sehr große Objekte (z.B. Erdoberfläche) liefert z.B. die Radar-Altimetrie exakte Höhenangaben, bedingt aber einen technisch aufwendigen Sensor und erfordert genaue Sensorpositionsbestimmungen. Optische Verfahren, insbesondere Laser-basierte, erfordern im Allgemeinen einen relativ hohen Kalibrieraufwand. Ein spezielles optisches Verfahren ist die Stereometrie, bei dem die zu untersuchende Oberfläche aus leicht unterschiedlichem Blickwinkel aufgenommen wird und aus der Auswertung der leichten stereoskopischen Abweichungen die Strukturen der Oberfläche errechnet werden.

Die vorliegende Erfindung geht aus von den bekannten optischen Verfahren zur Erfassung und Rekonstruktion von Oberflächenstrukturen. Ihr liegt die Aufgabe zugrunde, ein neues Verfahren zu entwickeln, dass sich durch einen breiten Anwendungsbereich auszeichnet. Diese Aufgabe wird gelöst durch das Verfahren nach Anspruch 1. Weitere Details und Vorteile der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird im Folgenden näher erläutert und Anwendungsbeispiele dargestellt. Dabei wird Bezug genommen auf die Figuren und den darin angegebenen Bezugszeichen. Es zeigen:

Fig. 1 Aufnahme eines Teils der Mondoberfläche

Fig. 2 Detail-Ausschnitt aus Figur 1 bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen 2.1 und 2.2

Fig. 3 Extraktion der Schattenfelder aus Fig. 2.1 und 2.2

Fig. 4 Hervorhebung der Umrisslinien der Schattenfelder in Figur 2.1 und 2.2

Fig. 5 Zusätzliche Hervorhebung des Verlaufs von Graten und Umrisslinien um Flanken der Erhebungen

5 Fig. 6 Profil-Rekonstruktion der untersuchten Region

Fig. 7 Aufnahmen eines ca. 0,5 cm hohen Grates auf einer Metallfläche; Lichteinfall von links und rechts

10 Fig. 8 Errechnetes Höhenprofil des Grates aus Fig. 7

Fig. 9 Perspektivische Darstellung des rekonstruierten Grates

15 Fig.10 Aufnahmen einer Werkstückoberfläche mit kleinem Defekt; Lichteinfall von links und rechts

Fig.11 Errechnetes Höhenprofil der Strukturen auf der Werkstückoberfläche der Figur 10

20 Fig.12 Bildüberlagerung farbselektiver Aufnahmen einer Oberflächenstruktur

25 Fig.13 Prägung auf einem Metallwerkstück; Aufnahmen bei unterschiedlichem Lichteinfall

Fig.14 Ausschnitt aus Fig. 13 mit Lichteinfallrichtungen (Pfeile) und rekonstruierten Aufnahmen

30 Fig.15 Rekonstruktion der Prägung nach dem erfindungsgemäßen Verfahren mit integriertem Shape from Shading

Das erfindungsgemäße Verfahren wertet verschiedene Bilder desselben Bereichs der zu untersuchenden Oberfläche aus, wo-

bei die Bilder aus nahezu vertikaler Perspektive bei stark unterschiedlichem Lichteinfall aus verschiedenen Seiten aufgenommen werden. Die Erfindung macht sich dabei die Tatsache zunutze, dass insbesondere bei streifendem Lichteinfall, d.h. mit einem Winkel zur Oberfläche von etwa 10° und darunter, Erhebungen oder Vertiefungen auf der Oberfläche einen deutlichen Schattenwurf zeigen. Die Formen der Schlagschatten sind dabei offensichtlich direkt abhängig von der Ausprägung des beleuchteten Profils, d.h. Ausdehnung, Höhen und Tiefen der Strukturen auf der Oberfläche korrelieren mit unterschiedlichen Konturen der Schlagschatten. Neben der Analyse der Schattenkonturen berücksichtigt das erfindungsgemäße Verfahren auch die unterschiedliche Lichtreflexion von geneigten Bereichen der Oberfläche, beispielsweise zur Ermittlung des Verlaufs einer Gratflanke.

Im einfachsten Fall nimmt man nur zwei Bilder unter Streiflicht auf, bei denen das Licht von verschiedenen (z.B. gegenüberliegenden) Seiten unter flachem Winkel auf die Strukturen scheint. Vorzugsweise – jedoch nicht zwingend – bleibt die Kameraposition relativ zur Oberfläche dabei unverändert, da sich in diesem Fall die Auswertung vereinfacht (identische Pixel-Koordinaten für identische Strukturen auf der Oberfläche). Verändert sich die Kameraposition, so können die Positionsverlagerungen durch entsprechende Korrekturen in der Auswertung berücksichtigt werden.

Die so gewonnenen Bilder werden für die weitere Auswertung in einem ersten Schritt so zur Deckung gebracht, dass korrespondierende Bildpunkte (Pixel) übereinander liegen (abgebildete Strukturen überdecken einander). In nächsten Schritt werden aus Grauwerten korrespondierender Pixel durch Quotientenbildung neue Bildpunkte errechnet. Aus zwei Ausgangsbildern mit Helligkeitswerten I_1 bzw. I_2 entstehen so zwei „Quotienten-

bilder" mit Pixelwerten I_1/I_2 bzw. I_2/I_1 . Durch die Quotientenbildung werden Bereiche mit geringer Albedo (auf ansonsten glatten Bereichen der Oberfläche), die bei Betrachtung nur eines Ausgangsbildes wegen des Helligkeitsunterschieds irrtümlich als Schatten gewertet werden könnten, annulliert, da beide Ausgangsbilder (gleicher Einstrahlwinkel der Lichtquelle vorausgesetzt) für diese Bereiche die gleichen Helligkeitswerte aufweisen, was sich damit bei Quotientenbildung aufhebt. Die Quotientenbilder enthalten dann - stark kontrastiert - die Schlagschattenbereiche separiert nach Lichteinfall, d.h. jedes Quotientenbild I_1/I_2 bzw. I_2/I_1 liefert die Areale der Schlagschatten, die jeweils bei Beleuchtung nur von einer Seite auftreten.

15 Im nächsten Schritt werden die Konturen der Schlagschatten-Areale extrahiert. Dies erfolgt beispielsweise durch eine „binary connected component“ (BCC)-Analyse der Quotientenbilder (vergl. E. Mandler, M. Oberländer: One Pass Encoding of Connected Components in Multi-Valued Images, *IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp64-69, Atlantic City, 1990). Die so erhaltenen Konturen können noch durch Glättungsverfahren, z.B. B-Spline-Interpolation (vergl. D.F. Rogers: *An Introduction to NURBS - With Historical Perspective*, Academic Press, San Diego, 2001) verfeinert werden, um die Genauigkeit der Profil-Rekonstruktion über die reine Auflösung der Bilder (Bildpunkt-Raster) hinaus weiter zu erhöhen. Alternativ können die beispielsweise mit dem BCC-Algorithmus ermittelten Konturen als Initialisierung für eine Segmentierung der Schattenumrisse auf den Ausgangsbildern mit Active-Contours verwendet werden (vergl. D.J. Williams, M. Shah: *A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation*, Computer Vision, Graphics Image Processing, 55, pp. 14-26, 1992).

Sind die Konturen der Schlagschatten für jeden Lichteinfall separat bestimmt, so können im nächsten Schritt der Verlauf eines Grates einer Erhebung aber auch Stufen auf der Oberfläche bestimmt werden. Hierzu wird davon ausgegangen, dass z.B.

5 bei seitlichem Lichteinfall unter flachem Winkel von rechts der nach links fallende Schlagschatten einer Erhebung in der Aufnahme eine Schattenumriss bildet, dessen rechter Rand durch den Grat der Erhebung selbst gebildet wird. Entsprechendes gilt analog für die zweite Aufnahme (Beleuchtung von

10 links). Ein Vergleich korrespondierender Randbereiche von Schattenkonturen beider Aufnahmen liefert für einen Grat gleiche Konturabschnitte in beiden Bildern (rechter Rand einer Schattenkontur in Bild A entspricht linkem Rand der korrespondierenden Kontur in Bild B. Eine Stufe auf der Oberfläche liefert demgegenüber nur auf einer der Aufnahmen eine

15 Schattenkontur.

Zu jedem Punkt eines auf diese Weise ermittelten Grates (oder einer Stufe) lässt sich die zugehörige Schattenlänge (Ausdehnung des Schlagschattens parallel zur Einstrahlrichtung der Lichtquelle) direkt aus den extrahierten Schattenkonturen entnehmen. Bei bekanntem Einstrahlwinkel ergibt sich daraus die Höhe des Gratpunktes (bzw. Kante bei einer Stufe) und damit der Höhenverlauf des Grates (bzw. der Stufe).

25 Im letzten Schritt werden die Neigungsverläufe auf der Oberfläche bestimmt. Die zur Lichtquelle hin geneigten Oberflächengebiete sind in den Aufnahmen deutlich heller als die ebenen Oberflächengebiete. Diese Regionen können aus den Aufnahmen beispielsweise wieder mittels BCC-Algorithmus extrahiert werden. Dazu wird als Auswahlkriterium zunächst für jedes der Ausgangsbilder ein jeweiliger Helligkeitswert θ_1 bzw. θ_2 als Schwellwert festgelegt und damit nur die Regionen selektiert, deren Bildpunkte heller als der vorgegebene

Schwellwert θ_1 bzw. θ_2 ist. Zusätzlich wird berücksichtigt, welche der so selektierten Bereiche jeweils nur in einem der beiden Ausgangsbilder beleuchtet sind und im anderen nicht, d.h. für die in den jeweiligen Quotientenbildern gilt

5 $I_1/I_2 > \theta_0$ (bzw. $I_2/I_1 > \theta_0$), wobei θ_0 ein vorgegebener Schwellwert für die Quotientenbilder ist. Die auf diese Weise als Neigungsflächen identifizierten Bereiche können wieder mittels BCC-Algorithmus und/oder Active-Contour Verfahren als Konturverläufe extrahiert werden. In Verbindung mit dem er-
10 mittelten Höhenverlauf (Grat) lässt sich der Neigungswinkel abschätzen (z.B. einer Gratflanke) und damit letztlich das Profil der Erhebung rekonstruieren.

Der Verlauf von Flanken ist hierbei nur relativ grob angenähert bestimbar (lineare Steigung). Veränderungen des Neigungsverlaufs oder auch flache Strukturen (niedrige Senken, leichte Anhebungen mit geringer Neigung) lassen sich jedoch durch Shape-from-Shading Methoden bestimmen (vergl. X. Jiang, H. Bunke, Dreidimensionales Computersehen, Springer Verlag, Berlin 1997). Dabei werden leichte Veränderungen der reflektierten Lichtintensität ausgewertet, um bei bekannter geometrischer Anordnung zwischen Kamera, Objekt und Lichtquelle auf die jeweilige Neigung der reflektierenden Bereiche zu schließen. Kombiniert man das erfindungsgemäße Verfahren mit der
25 Shape-from-Shading Methode, so sind Oberflächenprofile mit hoher Qualität rekonstruierbar. Ein Beispiel hierfür ist in Fig. 13 - 15 wiedergegeben (Erläuterung unter Anwendungsbeispiel 3).

In besonders vorteilhafter Weise wird zunächst das Oberflächenprofil der zu rekonstruierenden Fläche bei geeigneter Initialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ermittelt. Anschließend wird dann in besonders gewinnbringender Weise der Winkel zwischen jedem Flächenelement und der für das Schattenbild gültigen Lichteinfallsrichtung mit einem

konstanten Faktor so multipliziert, dass der mittlere Höhenunterschied auf dem rekonstruierten Profil dem zuvor gemäß der oben erläuterten Schattenanalyse ermittelten mittleren Höhenunterschied entspricht. Mit diesem Profil als Initialisierung wird mittels der Shape-from-Shading Methode ein neues Oberflächenprofil berechnet. Dieser Vorgang wird iterativ so lange wiederholt, bis die mittlere Veränderung des Höhenprofils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist.

10

Bei den aus dem Stand der Technik bekannten Shape-from-Shading Methoden wird das Oberflächenprofil vielfach durch die iterative Minimierung einer Fehlerfunktion, welche die Abweichung zwischen realem und dem aus dem Oberflächenprofil rekonstruierten Bild, sowie weitere an die Oberfläche zu stellende Randbedingungen, wie zum Beispiel Glattheit Oberfläche und Integrabilität der Oberflächengradienten, berücksichtigt. In besonderer Weise kann diese iterative Minimierung dahingehend verbessert werden, dass bei der im Rahmen der Iteration bei der Shape-from-Shading Methode zu optimierenden Fehlerfunktion ein additiver Term hinzugefügt wird. Hierbei beschreibt dieser additive Term die Abweichung des aus dem im vorigen Iterationsschritt rekonstruierten Höhenprofil ermittelten Höhenunterschiedes in Lichteinfallsrichtung von dem mittels der Schattenanalyse bestimmten entsprechenden Höhenunterschied. Zur Initialisierung dieser vorteilhaften iterativen Minimierung kann in besonderer Weise das mittels der im vorigen Absatz beschriebenen Methode erhaltene Ergebnis genutzt werden.

20

Im beschriebenen einfachsten Fall einer Auswertung von nur zwei Aufnahmen (z.B. Links-Rechts-Beleuchtung) können Strukturen nicht ausreichend erfasst werden, die aufgrund ihrer Lage oder Form (hier z.B.: Verlauf einer Erhebung von links

nach rechts) in beiden Aufnahmen praktisch identische Abbildungen liefern. Diese Strukturen lassen sich jedoch einfach durch Wiederholung des Verfahrens bei Beleuchtung von anderen Seiten (hier z.B.: Oben/Unten-Beleuchtung) in entsprechender Weise identifizieren, so dass letztlich alle Profilanteile durch wiederholte Anwendung des Verfahrens bei unterschiedliche Einstrahlrichtung rekonstruiert werden können.

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich durch einen sehr breiten Anwendungsbereich aus. Sowohl Oberflächen astronomischer Objekte in großer Entfernung können untersucht werden, als auch übliche Produkte in der industriellen Fertigung, bis hin zu kleinen Strukturen unter dem Mikroskop. Drei Anwendungsbeispiele zur Oberflächenprofilerfassung und Rekonstruktion sollen dies verdeutlichen:

Anwendungsbeispiel 1

Rekonstruktion von Strukturen auf der Mondoberfläche

In Figur 1 ist ein Teil der Mondoberfläche wiedergegeben, wie er mit einem üblichen Teleskop aufgenommen werden kann (hier: 125mm Spiegelteleskop, 2600mm Brennweite, CCD-Kamera). In der dargestellten Region sind die Formationen „Hesiodus und „Wolf“ erkennbar (mit *H* bzw. *W* gekennzeichnet). Ein Detailausschnitt etwa zwischen diesen Formationen ist hervorgehoben und vergrößert in Figur 2.1 und 2.2 wiedergegeben. Dabei zeigt Teilbild 2.1 diesen Bereich bei Lichteinfall von links und Teilbild 2.2 den Bereich bei Lichteinfall von rechts, wo bei die Sonneneinstrahlung jeweils unter einem flachen Winkel von ca. 4° zur Mondoberfläche einfällt. Deutlich sind die seitlichen Schattenfelder der Erhebungen zu erkennen. Figur 3 zeigt die kontrastverstärkte Extraktion der Schattenfelder durch rechnerische Bildung des Quotienten I_1/I_2 (bzw. I_2/I_1)

aus den Helligkeitswerten korrespondierender Bildpunkte aus beiden Bildern. Die daraus mittels BCC-Analyse bestimmten Konturen sind als Umrisslinien in das jeweilige Teilbild der Figur 4 eingetragen. Figur 5 zeigt zusätzlich die ermittelten 5 Umrisslinien der Grat- bzw. Kraterflanken (Linien um helle Bereiche), sowie die aus den Konturen abgeleiteten Lagen der Scheitelpunkte der Grade bzw. des Kraterrands.

Figur 6 zeigt eine perspektivische Darstellung des rekonstruierten Profils der analysierten Mondregion.
10

Anwendungsbeispiel 2

Rekonstruktion von Strukturen auf Werkstücken

15 Im Bereich der industriellen Qualitätskontrolle kann das erfundungsgemäße Verfahren beispielsweise zur Oberflächenprüfung von Rohbauteilen eingesetzt werden. Dabei können verschiedene Strukturen untersucht werden: Grade, Schweißnähte, 20 konvexe und konkave Wölbungen, Lunker und Einschlüsse usw. Dies wird derzeit oftmals noch durch manuelles „Tasten“ oder mittels Photogrammetrie bei hohem Kalibrieraufwand im Messlabor bewerkstelligt. Durch das neue Verfahren erübrigt sich 25 der Kalibrieraufwand. Zudem kann bei geeigneter Kamerabrennweite auch mit verhältnismäßig großem Abstand vom Objekt vermessen werden. Das von der Kamera aufgenommene Bild kann dabei zusätzlich mit gespeicherten, z.B. aus CAD-Daten erzeugten Bildinformationen („Drahtmodell“) verglichen werden und so auch geringfügige Abweichungen vom Soll-Profil detektiert 30 werden.

In den beiden Teilbildern der Figur 7 ist ein Grat auf einer ansonsten ebenen Werkstückoberfläche wiedergegeben, wobei die Beleuchtung zum einen von links, zum anderen von rechts unter

flachem Winkel zur Oberfläche einfällt. Figur 8 zeigt das aus diesen Aufnahmen mit dem erfindungsgemäßen Verfahren bestimmte Höhenprofil des Grates, der eine Höhe von bis zu etwa 5 mm aufweist. Zwei perspektivische Ansichten des rekonstruierten 5 Grades sind in Figur 9 wiedergegeben.

Auch deutlich kleinere Strukturen lassen sich so bestimmen: Figur 10 zeigt in zwei Teilbildern (streifende Beleuchtung von verschiedenen Seiten) den Oberflächenausschnitt eines 10 weiteren untersuchten Werkstücks (Metallplatte) mit relativ kleinen Defekten (zwei parallel verlaufende Grade). Die Grade selbst sind bei senkrechter Kameraposition fast nicht erkennbar, deutlich sind aber die durch seitliche Beleuchtung erzeugten Schatten der Grade (punktierte Linien). Nach Auswertung 15 dieser Bilder mit dem erfindungsgemäßen Verfahren lässt sich das Profil der Grade wie in Figur 11 dargestellt rekonstruieren. Die Höhe der Grade beträgt in diesem Beispiel etwa 1,5 bzw. 0,6 mm).

20 Anwendungsbeispiel 3 :

Rekonstruktion einer Prägung mit integriertem „Shape-from-Shading“

25 Figur 13 zeigt ein Werkstück aus Metall mit einer Prägung (Ausschnitte) bei Beleuchtung von unterschiedlichen Seiten. In Figur 14 sind die Ausschnitte wiedergegeben, die Pfeile geben die Einstrahlrichtung an, die rechten Teilbilder sind 30 die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren erhaltenen Rekonstruktionen. Figur 15 ist die perspektivische Darstellung des Ergebnisses mit integriertem Shape-from-Shading, so dass die rekonstruierten Verläufe von Flanken und Mulden gut mit dem Original übereinstimmen. Die Prägungstiefe beträgt in diesem Beispiel etwa 0,4 mm.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann in verschiedener Weise umgesetzt werden. Beispielsweise kann die Beleuchtung des zu untersuchenden Objekts durch eine einzige Lichtquelle erfolgen, die für die verschiedenen Beleuchtungswinkel um die entsprechende Drehachse (Lot von Kamera zum Objekt) geschwenkt wird. Mit gleichem Ergebnis kann die Lichtquelle ortsfest angeordnet sein und das Objekt rotiert (gleiche Drehachse).

10

Bei mehreren Lichtquellen können Schwenk- oder Rotationsmechanismen entfallen. Dabei werden die Bilder dann zeitlich nacheinander mit jeweils einer eingeschalteten Lichtquelle aufgenommen. Bei Verwendung von Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlängen (z.B. rot und grün) können die Bilder auch simultan aufgenommen werden und durch Farbfilter die jeweiligen Belichtungsteilbilder separiert werden. Als Beispiel zeigt Figur 12 eine Überlagerung solcher Farbfilteraufnahmen.

20 Der Begriff „Licht“ ist dabei nicht auf das sichtbare Spektrum begrenzt, d.h. auch IR oder UV Lichtquellen können mit entsprechender Kameraausstattung eingesetzt werden.

Zur Bildaufnahme sind alle Kameras mit entsprechender Auflösung geeignet. Grundsätzlich gilt dabei: höhere Auflösung bewirkt höhere Rekonstruktionsgenauigkeit. Heutige CCD-Kameras bieten hohe Auflösungen und liefern digitale Bilder, die direkt zur Auswertung mittels EDV zur Verfügung stehen. Damit lässt sich bereits aus handelsüblichen Komponenten (Kamera, Laptop, Stativ, Lichtquelle) eine transportable Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens zusammenstellen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur optischen Erfassung und Rekonstruktion von
5 Oberflächenprofilen,
durch gekennzeichnet,
dass die zu untersuchende Oberfläche aus verschiedenen
Richtungen unter flachem Einstrahlwinkel beleuchtet wird
und dabei Aufnahmen der Oberfläche aus einer Kameraposition
10 mit steilem Winkel zu Oberfläche angefertigt werden
und durch Extraktion der Konturen von Schlagschatten auf
den Aufnahmen aus Lichteinfallwinkel und Kameraposition
Höhenprofile von Strukturen ermittelt werden.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1
durch gekennzeichnet,
dass die Kamera nahezu lotrecht zur Oberfläche angeordnet
wird.
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
durch gekennzeichnet,
dass der Lichteinfallwinkel kleiner 10° zur Oberfläche
beträgt.
- 25 4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3,
durch gekennzeichnet,
dass die Schlagschatten auf den Aufnahmen durch Bildung
der Quotienten aus Helligkeitswerten korrespondierender

Bildpunkte extrahiert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Konturen der Schlagschatten mittels „Binary-
Connected-Component“-Methode bestimmt werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass auch Konturen heller Lichtreflektion auf den Aufnah-
men selektiert und zur Rekonstruktion von stark ge-
neigten Bereichen der Oberfläche, beispielsweise einer
Gratflanke, auswertet werden.
- 15 7. Verfahren nach Anspruch 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Konturen heller Lichtreflektion dadurch festge-
legt werden, dass die reflektierte Lichtintensität einen
vorgegebenen Schwellwert übersteigt.
- 20 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
dadurch gekennzeichnet,
dass zusätzlich Helligkeitsverläufe nach der Shape-from-
Shading Methode ausgewertet und zur Rekonstruktion der O-
berflächenstrukturen herangezogen werden.
- 25 9. Verfahren nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet,
dass bei der Rekonstruktion der Oberflächenstrukturen zu-
nächst das Oberflächenprofil der zu rekonstruierenden
Fläche bei geeigneter Initialisierung mittels der Shape-
from-Shading Methode ermittelt wird,
dass anschließend der Winkel zwischen jedem Flächenele-
ment und der für das Schattenbild gültigen Lichteinfalls-

richtung mit einem konstanten Faktor so multipliziert wird, dass der mittlere Höhenunterschied auf dem rekonstruierten Profil dem zuvor gemäß der oben erläuterten Schattenanalyse ermittelten mittleren Höhenunterschied

5 entspricht,

dass im nächsten Schritt als Initialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ein neues Oberflächenprofil berechnet wird,

und dass dieser Vorgang iterativ solange wiederholt wird,
10 bis die mittlere Veränderung des Höhenprofils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist.

10. Verfahren nach Anspruch 8,

15 dadurch gekennzeichnet,

dass bei einer iterativen Minimierung im Rahmen der Shape-from-Shading Methode diese dahingehend verbessert wird,

dass bei der zu optimierenden Fehlerfunktion ein zusätzlicher Fehlerterm addiert wird, wobei dieser additive Term die Abweichung des aus dem im vorigen Iterations-
20 schritt rekonstruierten Höhenprofil ermittelten Höhenunterschiedes in Lichteinfallsrichtung von dem mittels der Schattenanalyse bestimmten entsprechenden Höhenunter-

25 schied beschreibt.

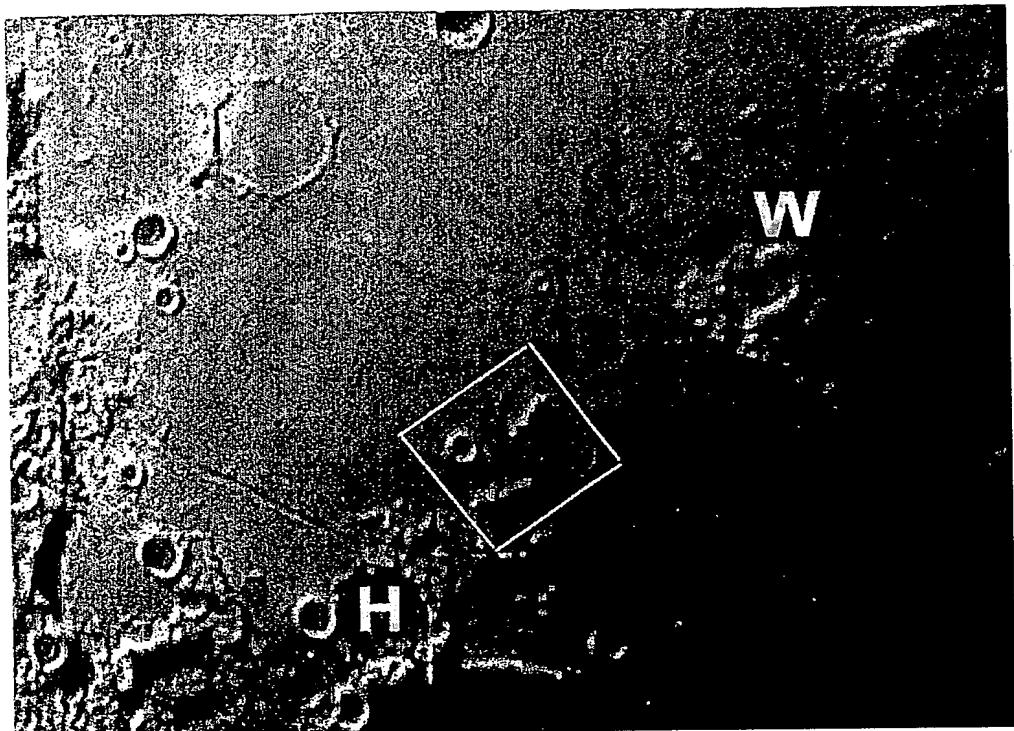
11. Verfahren nach Anspruch 10,

dadurch gekennzeichnet,

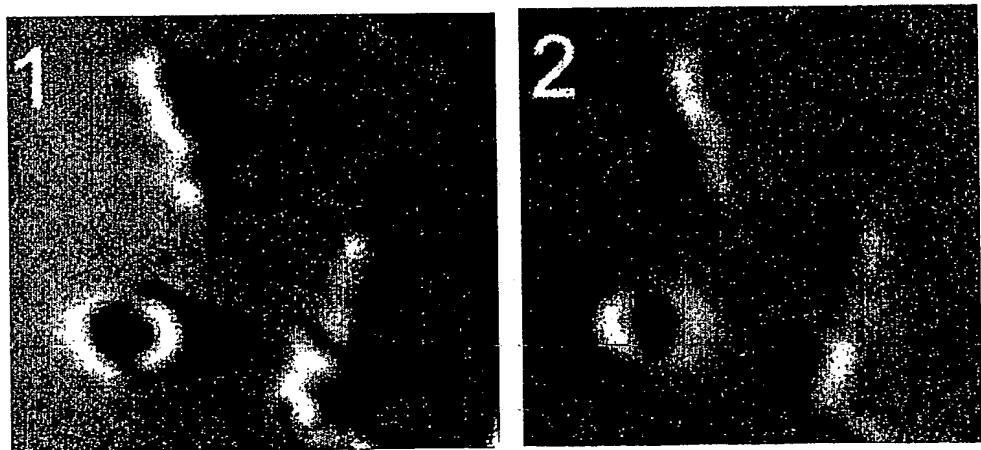
dass zur Initialisierung der iterativen Minimierung das Ergebnis des Verfahrens nach Anspruch 9 verwendet wird.
30

12. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11, zur Rekonstruktion von planetaren Oberflächen.

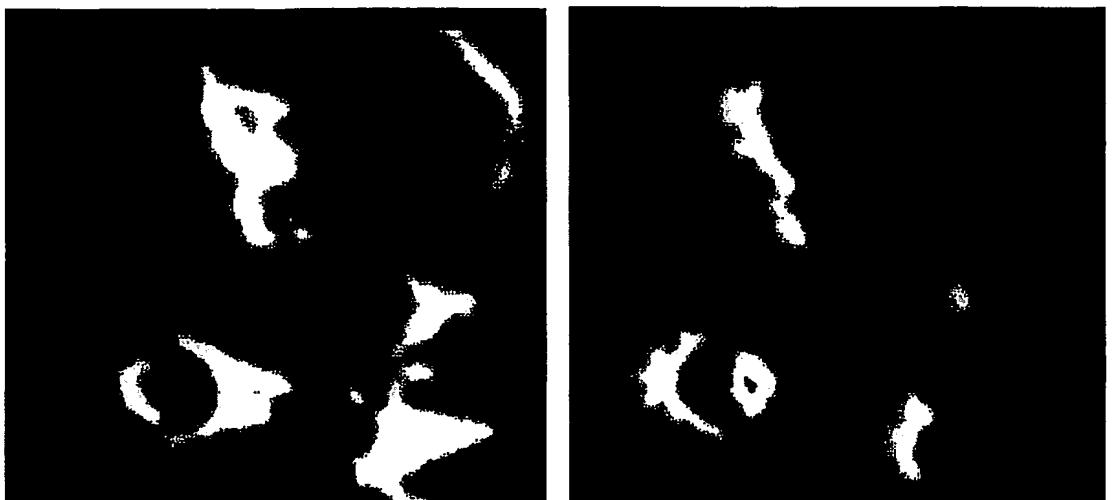
13. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11, zur Inspektion der Oberfläche industrieller Bauteile.



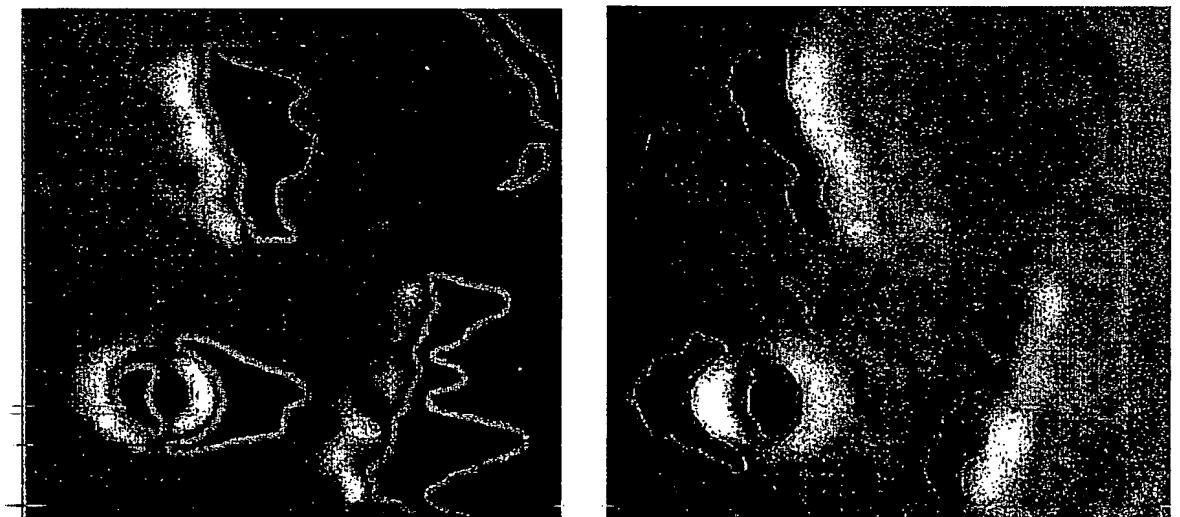
Figur 1



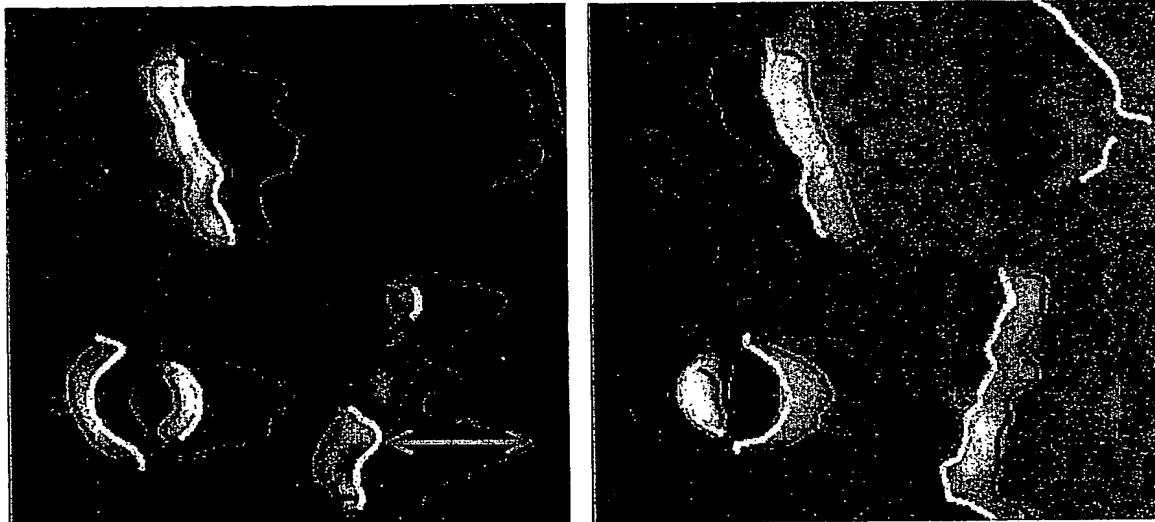
Figur 2



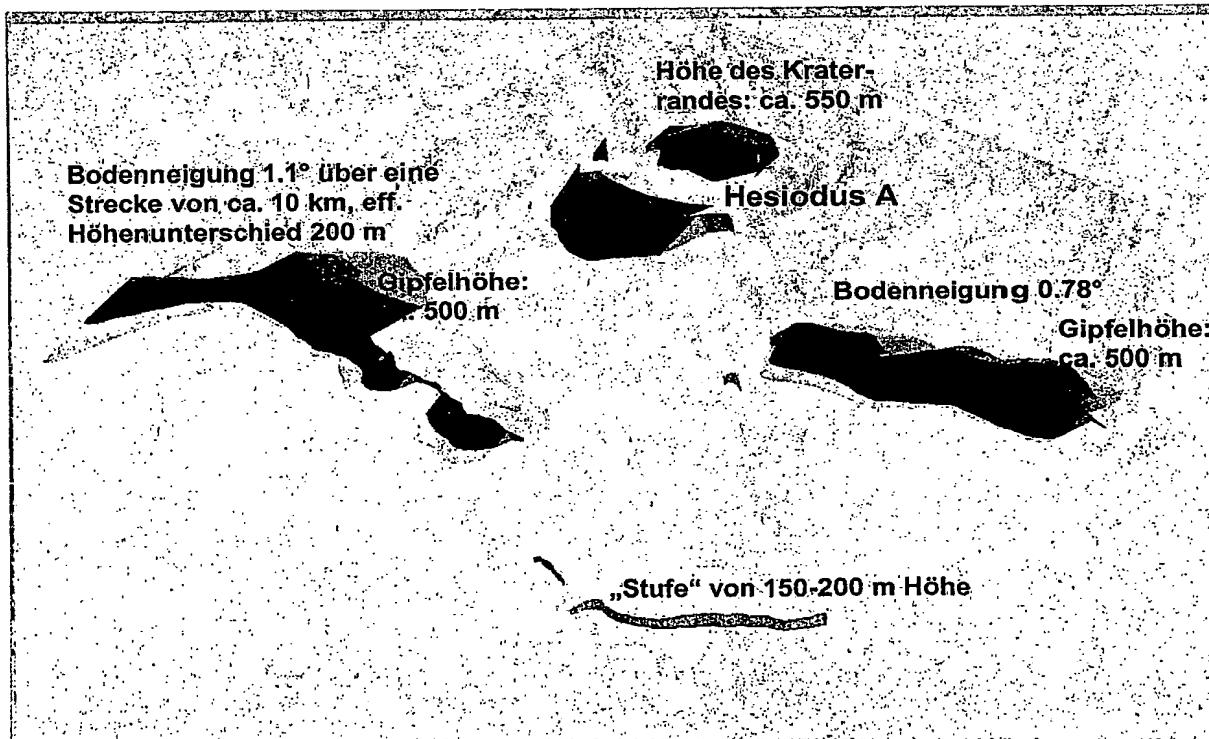
Figur 3



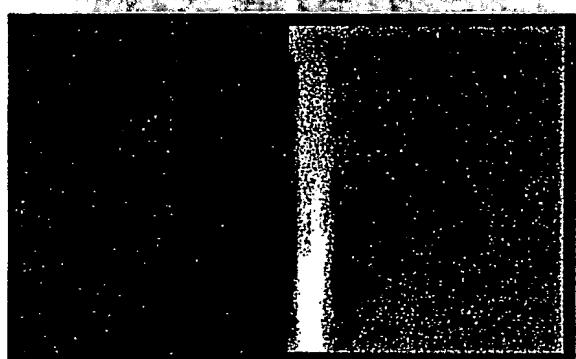
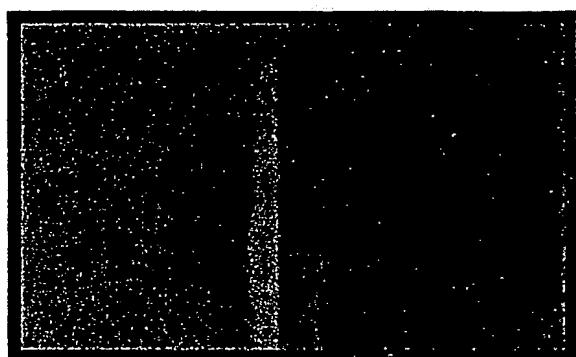
Figur 4



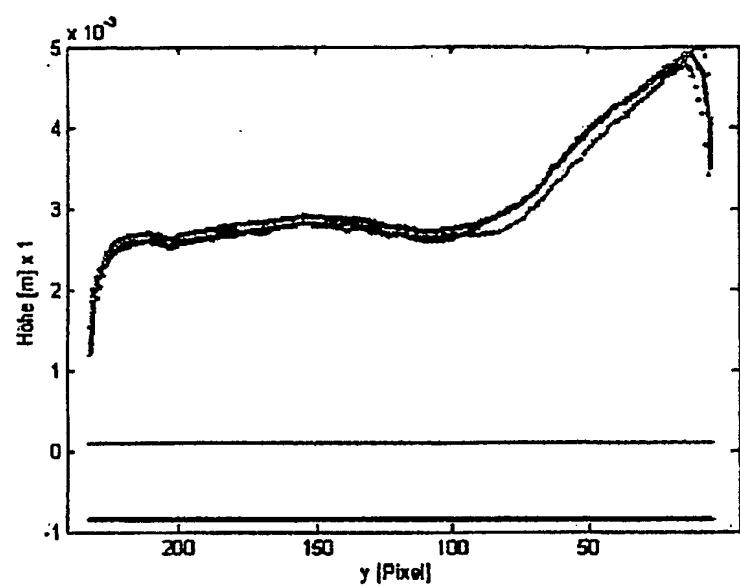
Figur 5



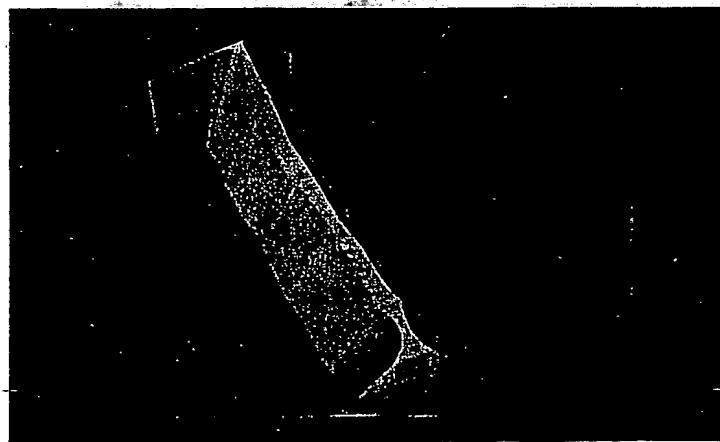
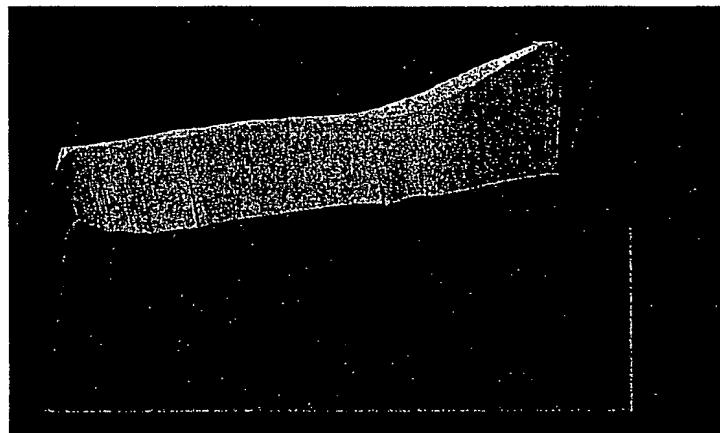
Figur 6



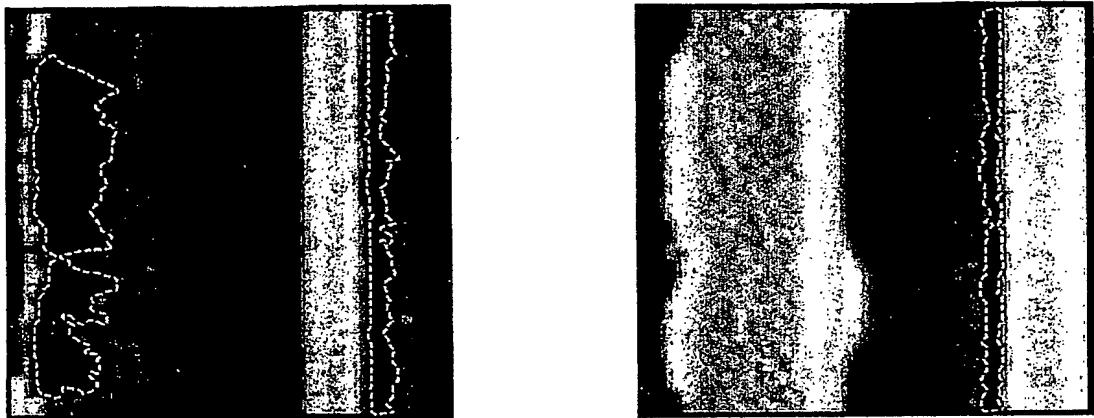
Figur 7



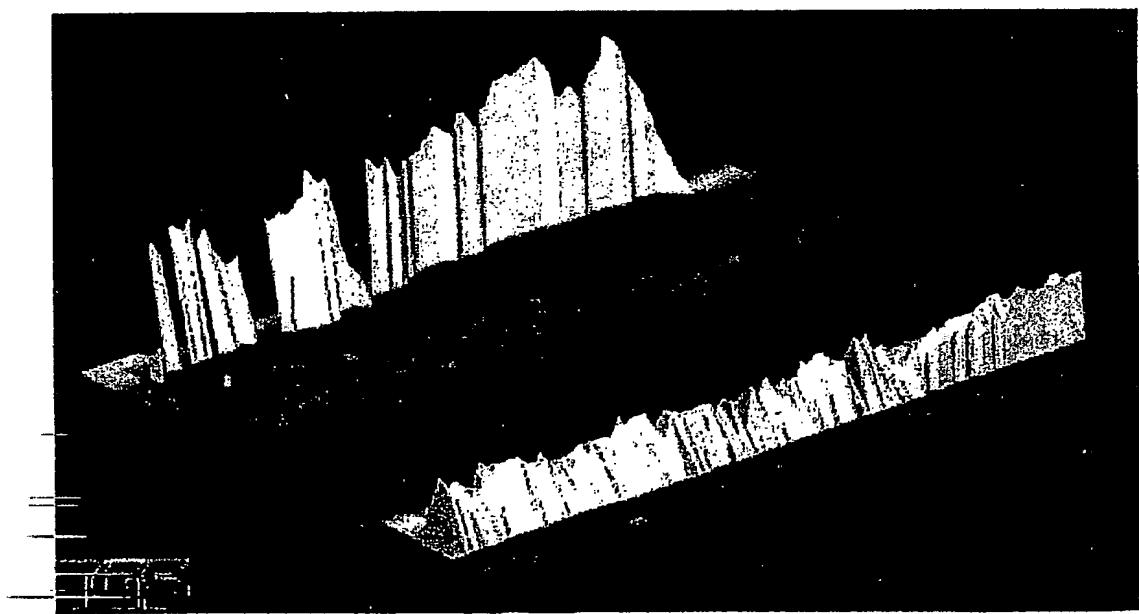
Figur 8



Figur 9



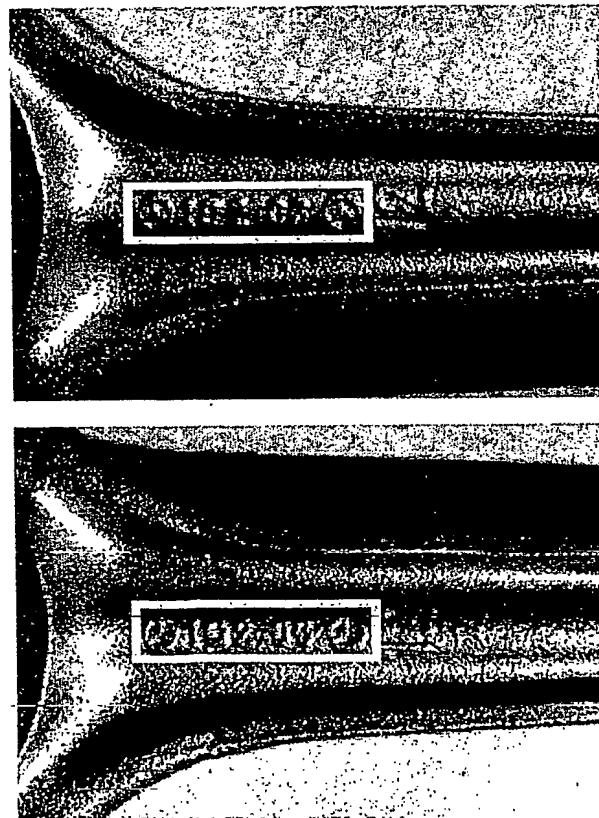
Figur 10



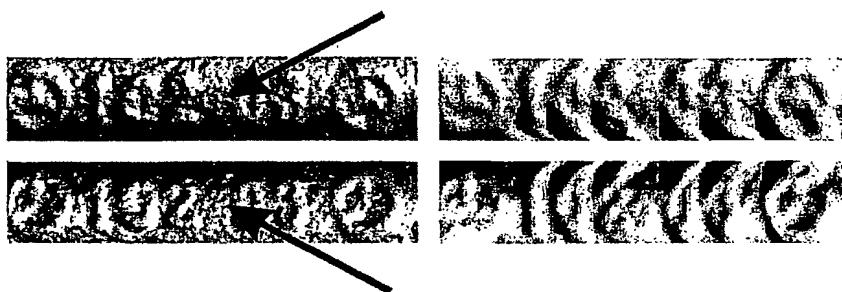
Figur 11



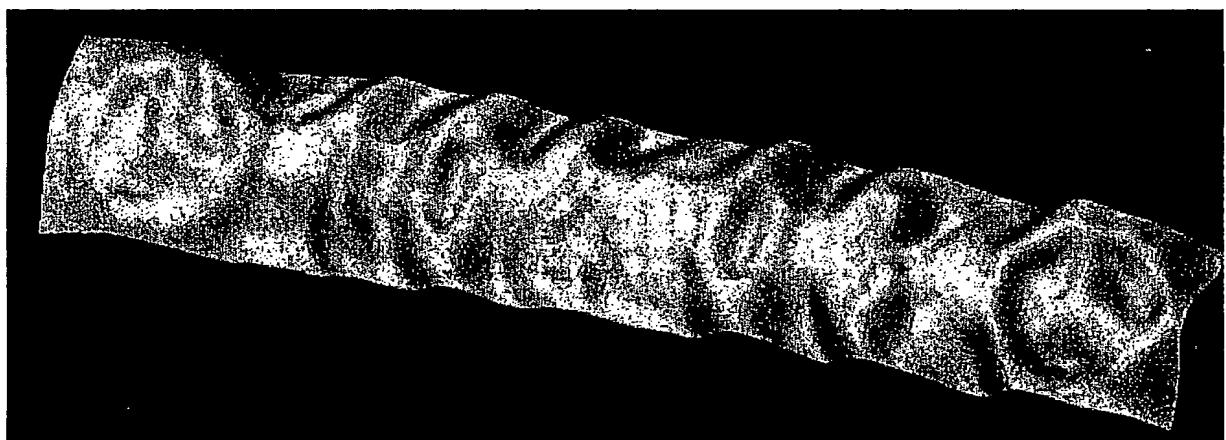
Figur 12



Figur 13



Figur 14



Figur 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2004/010729

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 IPC 7 G01N21/84 G01N21/88 G01N21/956

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 IPC 7 G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 064 291 A (REISER KURT) 12 November 1991 (1991-11-12) column 2, line 41 – line 60 column 8, line 30 – column 9, line 24; figure 7	1
A	US 2002/118359 A1 (FAIRLEY CHRISTOPHER R ET AL) 29 August 2002 (2002-08-29) paragraph '0072! – paragraph '0078!; figures 3-7	2,3,13
A	EP 0 848 244 A (MICRONAS INTERMETALL GMBH) 17 June 1998 (1998-06-17) column 8, line 2 – line 55; figure 4	1-3,13
	----- ----- ----- -----	1-3,13

 Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

Date of mailing of the international search report

4 January 2005

18/01/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Stuebner, B

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2004/010729

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	GB 2 297 616 A (NIRECO CORP) 7 August 1996 (1996-08-07) page 3, paragraph 3 – page 4, paragraph 2 page 8, paragraph 2 – page 11, paragraph 2; figures 1-4 -----	1,2,7,13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/010729

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)		Publication date
US 5064291	A	12-11-1991	JP	2062048 C		10-06-1996
			JP	4364443 A		16-12-1992
			JP	7097084 B		18-10-1995
			KR	9509067 B1		14-08-1995
US 2002118359	A1	29-08-2002	US	6288780 B1		11-09-2001
			US	5822055 A		13-10-1998
			US	2004252297 A1		16-12-2004
			US	2002054291 A1		09-05-2002
			US	6078386 A		20-06-2000
			US	2003063274 A1		03-04-2003
			US	2004017562 A1		29-01-2004
			US	2004223146 A1		11-11-2004
			WO	9639619 A1		12-12-1996
EP 0848244	A	17-06-1998	DE	19652124 A1		25-06-1998
			EP	0848244 A2		17-06-1998
			JP	10275885 A		13-10-1998
			US	5940681 A		17-08-1999
GB 2297616	A	07-08-1996	JP	3041826 B2		15-05-2000
			JP	7333154 A		22-12-1995
			JP	7333156 A		22-12-1995
			DE	19520190 A1		15-02-1996
			DE	19549545 C2		08-08-2002
			GB	2289941 A , B		06-12-1995

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/010729

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 G01N21/84 G01N21/88 G01N21/956

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 G01N

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der Internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 5 064 291 A (REISER KURT) 12. November 1991 (1991-11-12)	1
A	Spalte 2, Zeile 41 – Zeile 60 Spalte 8, Zeile 30 – Spalte 9, Zeile 24; Abbildung 7	2,3,13
A	US 2002/118359 A1 (FAIRLEY CHRISTOPHER R ET AL) 29. August 2002 (2002-08-29) Absatz '0072! – Absatz '0078!; Abbildungen 3–7	1–3,13
A	EP 0 848 244 A (MICRONAS INTERMETALL GMBH) 17. Juni 1998 (1998-06-17) Spalte 8, Zeile 2 – Zeile 55; Abbildung 4	1–3,13
		–/–

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

Siehe Anhang Patentfamilie

- ° Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- *A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- *E* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldeatum veröffentlicht worden ist
- *L* Veröffentlichung, die gezeigt ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- *O* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- *P* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldeatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

- *T* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldeatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- *X* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- *Y* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- *&* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der Internationalen Recherche

Absendedatum des Internationalen Recherchenberichts

4. Januar 2005

18/01/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL – 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Stuebner, B

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/010729

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie ^a	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	GB 2 297 616 A (NIRECO CORP) 7. August 1996 (1996-08-07) Seite 3, Absatz 3 - Seite 4, Absatz 2 Seite 8, Absatz 2 - Seite 11, Absatz 2; Abbildungen 1-4 -----	1,2,7,13

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

 Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/010729

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung		Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 5064291	A	12-11-1991	JP	2062048 C		10-06-1996
			JP	4364443 A		16-12-1992
			JP	7097084 B		18-10-1995
			KR	9509067 B1		14-08-1995
US 2002118359	A1	29-08-2002	US	6288780 B1		11-09-2001
			US	5822055 A		13-10-1998
			US	2004252297 A1		16-12-2004
			US	2002054291 A1		09-05-2002
			US	6078386 A		20-06-2000
			US	2003063274 A1		03-04-2003
			US	2004017562 A1		29-01-2004
			US	2004223146 A1		11-11-2004
			WO	9639619 A1		12-12-1996
EP 0848244	A	17-06-1998	DE	19652124 A1		25-06-1998
			EP	0848244 A2		17-06-1998
			JP	10275885 A		13-10-1998
			US	5940681 A		17-08-1999
GB 2297616	A	07-08-1996	JP	3041826 B2		15-05-2000
			JP	7333154 A		22-12-1995
			JP	7333156 A		22-12-1995
			DE	19520190 A1		15-02-1996
			DE	19549545 C2		08-08-2002
			GB	2289941 A ,B		06-12-1995

VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS

PCT

INTERNATIONALER VORLÄUFIGER BERICHT ÜBER DIE PATENTIERBARKEIT

REC'D 05 JAN 2006

PCT

(Kapitel II des Vertrags über die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Patentwesens)

Aktenzeichen des Anmelders oder Anwalts P802626/WO/I	WEITERES VORGEHEN	siehe Formblatt PCT/PEA/416
Internationales Aktenzeichen PCT/EP2004/010729	Internationales Anmelde datum (Tag/Monat/Jahr) 24.09.2004	Prioritätsdatum (Tag/Monat/Jahr) 02.10.2003
Internationale Patentklassifikation (IPK) oder nationale Klassifikation und IPK G01N21/84, G01N21/88, G01N21/956		
Anmelder DAIMLERCHRYSLER AG et al.		

1. Bei diesem Bericht handelt es sich um den internationalen vorläufigen Prüfungsbericht, der von der mit der internationalen vorläufigen Prüfung beauftragten Behörde nach Artikel 35 erstellt wurde und dem Anmelder gemäß Artikel 36 übermittelt wird.
2. Dieser BERICHT umfaßt insgesamt 5 Blätter einschließlich dieses Deckblatts.
3. Außerdem liegen dem Bericht ANLAGEN bei; diese umfassen
 - a. (*an den Anmelder und das Internationale Büro gesandt*) insgesamt 6 Blätter; dabei handelt es sich um
 - Blätter mit der Beschreibung, Ansprüchen und/oder Zeichnungen, die geändert wurden und diesem Bericht zugrunde liegen, und/oder Blätter mit Berichtigungen, denen die Behörde zugestimmt hat (siehe Regel 70.16 und Abschnitt 607 der Verwaltungsvorschriften).
 - Blätter, die frühere Blätter ersetzen, die aber aus den in Feld Nr. 1, Punkt 4 und im Zusatzfeld angegebenen Gründen nach Auffassung der Behörde eine Änderung enthalten, die über den Offenbarungsgehalt der internationalen Anmeldung in der ursprünglich eingereichten Fassung hinausgeht.
 - b. (*nur an das Internationale Büro gesandt*)> insgesamt (bitte Art und Anzahl der/des elektronischen Datenträger(s) angeben), der/die ein Sequenzprotokoll und/oder die dazugehörigen Tabellen enthält/enthalten, nur in computerlesbarer Form, wie im Zusatzfeld betreffend das Sequenzprotokoll angegeben (siehe Abschnitt 802 der Verwaltungsvorschriften).
4. Dieser Bericht enthält Angaben zu folgenden Punkten:
 - Feld Nr. I Grundlage des Bescheids
 - Feld Nr. II Priorität
 - Feld Nr. III Keine Erstellung eines Gutachtens über Neuheit, erfinderische Tätigkeit und gewerbliche Anwendbarkeit
 - Feld Nr. IV Mangelnde Einheitlichkeit der Erfindung
 - Feld Nr. V Begründete Feststellung nach Artikel 35(2) hinsichtlich der Neuheit, der erfinderischen Tätigkeit und der gewerblichen Anwendbarkeit; Unterlagen und Erklärungen zur Stützung dieser Feststellung
 - Feld-Nr. VI Bestimmte angeführte Unterlagen
 - Feld-Nr. VII Bestimmte Mängel der internationalen Anmeldung
 - Feld Nr. VIII Bestimmte Bemerkungen zur internationalen Anmeldung

Datum der Einreichung des Antrags 01.08.2005	Datum der Fertigstellung dieses Berichts 04.01.2006
Name und Postanschrift der mit der internationalen Prüfung beauftragten Behörde Europäisches Patentamt D-80298 München Tel. +49 89 2399 - 0 Tx: 523656 epmu d Fax: +49 89 2399 - 4465	Bevollmächtigter Bediensteter Stuebner, B Tel. +49 89 2399-2179



INTERNATIONALER VORLÄUFIGER BERICHT ÜBER DIE PATENTIERBARKEIT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/010729

Feld Nr. I Grundlage des Berichts

1. Hinsichtlich der **Sprache** beruht der Bericht auf der internationalen Anmeldung in der Sprache, in der sie eingereicht wurde, sofern unter diesem Punkt nichts anderes angegeben ist.
 - Der Bericht beruht auf einer Übersetzung aus der Originalsprache in die folgende Sprache, bei der es sich um die Sprache der Übersetzung handelt, die für folgenden Zweck eingereicht worden ist:
 - internationale Recherche (nach Regeln 12.3 und 23.1 b))
 - Veröffentlichung der internationalen Anmeldung (nach Regel 12.4)
 - internationale vorläufige Prüfung (nach Regeln 55.2 und/oder 55.3)
 2. Hinsichtlich der **Bestandteile*** der internationalen Anmeldung beruht der Bericht auf (*Ersatzblätter, die dem Anmeldeamt auf eine Aufforderung nach Artikel 14 hin vorgelegt wurden, gelten im Rahmen dieses Berichts als "ursprünglich eingereicht" und sind ihm nicht beigefügt*):

Beschreibung, Seiten

- 1, 3-12** in der ursprünglich eingereichten Fassung
2, 2a eingegangen am 04.08.2005 mit Schreiben vom 01.08.2005

Ansprüche, Nr.

- eingegangen am 04.08.2005 mit Schreiben vom 01.08.2005

Zeichnungen, Blätter

- 1/8-8/8** in der ursprünglich eingereichten Fassung

Zeichnungen, Figuren

- 1-15 In der ursprünglich eingereichten Fassung

- einem Sequenzprotokoll und/oder etwaigen dazugehörigen Tabellen - siehe Zusatzfeld betreffend das Sequenzprotokoll

3. Aufgrund der Änderungen sind folgende Unterlagen fortgefallen:

 - Beschreibung: Seite
 - Ansprüche: Nr.
 - Zeichnungen: Blatt/Abb.
 - Sequenzprotokoll (*genaue Angaben*):
 - etwaige zum Sequenzprotokoll gehörende Tabellen (*genaue Angaben*):

4. Dieser Bericht ist ohne Berücksichtigung (von einigen) der diesem Bericht beigefügten und nachstehend aufgelisteten Änderungen erstellt worden, da diese aus den im Zusatzfeld angegebenen Gründen nach Auffassung der Behörde über den Offenbarungsgehalt in der ursprünglich eingereichten Fassung hinausgehen (Regel 70.2 c)).

 - Beschreibung: Seite
 - Ansprüche: Nr.
 - Zeichnungen: Blatt/Abb.
 - Sequenzprotokoll (*genaue Angaben*):
 - etwaige zum Sequenzprotokoll gehörende Tabellen (*genaue Angaben*):

* Wenn Punkt 4 zutrifft, können einige oder alle dieser Blätter mit der Bemerkung "ersetzt" versehen werden.

**INTERNATIONALER VORLÄUFIGER BERICHT
ÜBER DIE PATENTIERBARKEIT**

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/010729

Feld Nr. V Begründete Feststellung nach Artikel 35 (2) hinsichtlich der Neuheit, der erfinderischen Tätigkeit und der gewerblichen Anwendbarkeit; Unterlagen und Erklärungen zur Stützung dieser Feststellung

1. Feststellung
Neuheit (N) Ja: Ansprüche 1-12
Nein: Ansprüche
- Erfinderische Tätigkeit (IS) Ja: Ansprüche 1-12
Nein: Ansprüche
- Gewerbliche Anwendbarkeit (IA) Ja: Ansprüche: 1-12
Nein: Ansprüche:

2. Unterlagen und Erklärungen (Regel 70.7):

siehe Beiblatt

Feld Nr. VIII Bestimmte Bemerkungen zur internationalen Anmeldung

Zur Klarheit der Patentansprüche, der Beschreibung und der Zeichnungen oder zu der Frage, ob die Ansprüche in vollem Umfang durch die Beschreibung gestützt werden, ist folgendes zu bemerken:

siehe Beiblatt

**INTERNATIONALER VORLÄUFIGER
BERICHT ZUR PATENTIERBARKEIT
(BEIBLATT)**

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/010729

Zu Punkt V

Begründete Feststellung hinsichtlich der Neuheit, der erfinderischen Tätigkeit und der gewerblichen Anwendbarkeit; Unterlagen und Erklärungen zur Stützung dieser Feststellung

1. In diesem Bericht wird folgendes, im Recherchenbericht zitiertes Dokumente (D) genannt:

D1: US-A-5 064 291 (REISER KURT) 12. November 1991 (1991-11-12)

2. In D1 (siehe z.B. Sp.2, Z.41-60; Sp.8, Z.31 bis Sp.9, Z.24; Fig.7) wird ein Verfahren beschrieben, das alle Merkmale entsprechend des Oberbegriffs des Anspruchs 1 aufweist.

Bekannt aus D1 ist auch die "Shape-from Shading Methode" um die Neigung der Oberfläche, bzw. Teile derselben zu bestimmen.

Nicht aus D1 bekannt ist dagegen die "Extraktion der Konturen von Schlagschatten", um die Höhenprofile zu ermitteln und somit auch nicht die Kombination mit der "Shape-from Shading Methode", um die Ermittlung der Höhenprofile weiter zu verbessern.

Die Lösung letzterer Aufgabe beruht auf einer erfinderischen Tätigkeit im Sinne des Artikels 33(1) PCT, insbesondere da diese vorteilhafte Kombination beider Methoden nicht dem zitierten Stand der Technik zu entnehmen ist.

3. Die abhängigen Ansprüche 2-10 und folglich auch die Verwendung nach den Ansprüchen 11 und 12 beruhen somit auch auf einer erfinderische Tätigkeit.

**INTERNATIONALER VORLÄUFIGER
BERICHT ZUR PATENTIERBARKEIT
(BEIBLATT)**

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/010729

Zu Punkt VIII

Bestimmte Bemerkungen zur internationalen Anmeldung

Anspruch 12 sollte sich auf die Ansprüche 1-10 rückbeziehen.

In der Beschreibung sollten einige Druckfehler korrigiert werden, z.B.:

Seite 6, Zeile 7 "einen Schattenumriss" und in Zeilen 12, bzw. 14 sollte die Klammer wieder geschlossen werden;

Seite 7; Z.27, 28: "Anwendungsbeispiel".

Aktz.: PCT/EP2004/010729

P802626/WO/1

Neue Patentansprüche 1-12

1. Verfahren zur optischen Erfassung und Rekonstruktion von Oberflächenprofilen,
bei dem die zu untersuchende Oberfläche aus verschiedenen Richtungen unter flachem Einstrahlwinkel beleuchtet wird und dabei Aufnahmen der Oberfläche aus einer Kameraposition mit steilem Winkel zu Oberfläche angefertigt werden,
dadurch gekennzeichnet,
dass durch Extraktion der Konturen von Schlagschatten in den Aufnahmen auf Grundlage der bekannten Lichteinfallwinkel und der Kameraposition Höhenprofile von Strukturen ermittelt werden,
wobei zusätzlich Helligkeitsverläufe nach der Shape-from-Shading Methode ausgewertet und zur Rekonstruktion der Oberflächenstrukturen herangezogen werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass bei der Rekonstruktion der Oberflächenstrukturen zunächst das Oberflächenprofil der zu rekonstruierenden Fläche bei geeigneter Initialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ermittelt wird,
dass anschließend der Winkel zwischen jedem Flächenelement und der für das Schattenbild gültigen Lichteinfallsrichtung mit einem konstanten Faktor so multipliziert wird, dass der mittlere Höhenunterschied auf dem rekonstruierten Profil

Aktz.: PCT/EP2004/010729

P802626/WO/1

dem zuvor gemäß der oben erläuterten Schattenanalyse ermittelten mittleren Höhenunterschied entspricht, dass im nächsten Schritt als Initialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ein neues Oberflächenprofil berechnet wird, und dass dieser Vorgang iterativ solange wiederholt wird, bis die mittlere Veränderung des Höhenprofils zwischen zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, dass bei einer iterativen Minimierung im Rahmen der Shape-from-Shading Methode diese dahingehend verbessert wird, dass bei der zu optimierenden Fehlerfunktion ein zusätzlicher Fehlerterm addiert wird, wobei dieser additive Term die Abweichung des aus dem im vorigen Iterationsschritt rekonstruierten Höhenprofil ermittelten Höhenunterschiedes in Lichteinfallsrichtung von dem mittels der Schattenanalyse bestimmten entsprechenden Höhenunterschied beschreibt.

4. Verfahren nach Anspruch 3,

dadurch gekennzeichnet, dass zur Initialisierung der iterativen Minimierung das Ergebnis des Verfahrens nach Anspruch 2 verwendet wird.

Aktz.: PCT/EP2004/010729

P802626/WO/1

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Kamera nahezu lotrecht zur Oberfläche angeordnet
wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Lichteinfallwinkel kleiner 10° zur Oberfläche
beträgt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Schlagschatten auf den Aufnahmen durch Bildung der
Quotienten aus Helligkeitswerten korrespondierender
Bildpunkte extrahiert werden.

8. Verfahren nach Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Konturen der Schlagschatten mittels „Binary-
Connected-Component“-Methode bestimmt werden.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass auch Konturen heller Lichtreflektion auf den Aufnahmen
selektiert und zur Rekonstruktion von stark geneigten
Bereichen der Oberfläche, beispielsweise einer Gratflanke,
auswertet werden.

Aktz.: PCT/EP2004/010729

P802626/WO/1

10. Verfahren nach Anspruch 9,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Konturen heller Lichtreflektion dadurch festgelegt
werden, dass die reflektierte Lichtintensität einen
vorgegebenen Schwellwert übersteigt.

11. Verwendung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden
Ansprüche, zur Rekonstruktion von planetaren Oberflächen.

12. Verwendung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden
Ansprüche, zur Inspektion der Oberfläche industrieller
Bauteile.

Aktz.: PCT/EP2004/010729

P802626/WO/1

Neue Beschreibungsseiten 2 und 2a

allen Umgebungen und für sehr große Distanzen zwischen Objekt und Sensor geeignet. Für sehr große Objekte (z.B. Erdoberfläche) liefert z.B. die Radar-Altimetrie exakte Höhenangaben, bedingt aber einen technisch aufwendigen Sensor und erfordert genaue Sensorpositionsbestimmungen. Optische Verfahren, insbesondere Laser-basierte, erfordern im Allgemeinen einen relativ hohen Kalibrieraufwand. Ein spezielles optisches Verfahren ist die Stereometrie, bei dem die zu untersuchende Oberfläche aus leicht unterschiedlichem Blickwinkel aufgenommen wird und aus der Auswertung der leichten stereoskopischen Abweichungen die Strukturen der Oberfläche errechnet werden.

Die Übertragung der vor allem aus der Astronomie bekannten Methode der Photoklinometrie auf eine industrielle Inspektionsaufgabe wird in der US 5,064,291 A1 beschrieben. Hierbei werden eine Vorrichtung und ein Verfahren aufgezeigt, mittels welchem der Querschnitt von Lötstellen ermittelt werden kann. Hierzu wird das zu untersuchende Werkstück auf durch mehrere in einer Ebene liegende Lichtquellen unter unterschiedlichen Einfallswinkeln sequentiell beleuchtet. Die von diesen einzelnen Beleuchtungssituationen von der Lötstelle reflektierte Strahlung wird von einer in der Ebene der Lichtquellen befindlichen Kamera erfasst und so ein 2-dimensionales Querschnittsprofil der Lötstelle erfasst.

Die vorliegende Erfindung geht aus von den bekannten optischen Verfahren zur Erfassung und Rekonstruktion von Oberflächenstrukturen. Ihr liegt die Aufgabe zugrunde, ein neues Verfahren zu entwickeln, dass sich durch einen breiten Anwendungsbereich auszeichnet. Diese Aufgabe wird gelöst durch das Verfah-

Aktz.: PCT/EP2004/010729

- 2a -

P802626/WO/1

ren nach Anspruch 1. Weitere Details und Vorzüge der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird im Folgenden näher erläutert und Anwendungsbeispiele dargestellt. Dabei wird Bezug genommen auf die Figuren und den darin angegebenen Bezugszeichen. Es zeigen:

Fig. 1 Aufnahme eines Teils der Mondoberfläche

Fig. 2 Detail-Ausschnitt aus Figur 1 bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen 2.1 und 2.2

Fig. 3 Extraktion der Schattenfelder aus Fig. 2.1 und 2.2

Hervorhebung der Umrisslinien der Schattenfelder in Figur 2.1 und 2.2